

Control de potencia activa y reactiva de un SMES para aplicaciones de soporte de potencia en un sistema de distribución.

John Edwin González López

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista

Director

M.Sc. Walter Julián Gil González

Co-Director

Ph.D. Alejandro Garcés Ruíz

Pereira, Agosto de 2018

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

Programa de Ingeniería Eléctrica



Nota de Aceptación

M.Sc. Walter Julián Gil González. Director

Ph.D. Alejandro Garcés Ruíz. Co-Director

Jurado

Pereira, Agosto de 2018

Control de potencia activa y reactiva de un SMES para aplicaciones de soporte de potencia en un sistema de distribución.

©John Edwin González López

Pereira, Agosto de 2018

Programa de Ingeniería Eléctrica

Universidad Tecnológica de Pereira

Carrera 27 No 10-02 Barrio Alamos - Risaralda - Colombia

TEL: (+57)(6)3137122

www.utp.edu.co

Versión web disponible en: *<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisd/index.html>*

Agradecimientos

A mis asesores Ph.D Alejandro Garcés Ruiz, en especial, al M.Sc Walter Julián Gil González por su gran apoyo, por permitirme trabajar con él, y por ayudar en mi formación académica, profesional y en la realización de este trabajo de grado.

De manera especial agradecimientos a mi madre, por la formación humana que me dio, su amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

Resumen

Este trabajo presenta un sistema de control de potencia en una unidad de almacenamiento de energía magnética por super-conducción SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) integrada a un sistema de distribución por medio de un convertidor PWM-CSC (*Pulse Width Modulated Current Source Converter*) con el fin de proporcionar un soporte de potencia en sistemas de distribución en aplicaciones que así lo requieran. Este sistema se fundamenta en el control de la potencia activa y reactiva por medio de la carga y descarga de energía de la unidad SMES, de tal manera que esta pueda entregar energía cuando existe ausencia de la misma en cortos lapsos de tiempo si así se requiere y almacenar energía cuando existe generación mayor a la necesaria. Para realizar el sistema de control se emplea un modelo de optimización semidefinida y la integración de las restricciones del método de *Lyapunov* para garantizar la estabilidad del sistema. El modelo matemático del sistema se obtiene aplicando las leyes de *Kirchhoff* al lado *ac* del convertidor (PWM-CSC) y el teorema de *Tellegen* para calcular la potencia activa transferida del lado *ac* al *dc* o viceversa.

Se realizan estudios sobre un sistema de prueba compuesto por una unidad SMES integrada mediante un convertidor PWM-CSC a un barraje infinito que representó el sistema de distribución; se consideraran tres escenarios diferentes de carga en donde se comprobó la capacidad de respuesta del sistema de control al realizar el soporte de potencia en el sistema de distribución.

Índice general

Índice general	iv
Índice de tablas	v
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	6
1.3.1. General	6
1.3.2. Específicos	6
1.4. Estado del arte	6
1.5. Alcance	8
1.6. Principales resultados	8
1.7. Estructura del trabajo de grado	9
Índice de figuras	1
2. Sistema de almacenamiento de energía	10
2.1. Sistemas de Acondicionamiento de Potencia para la integración del sistema SMES	13
2.2. Integración de una unidad SMES a la red de distribución	15
2.3. Modelo Dinámico del SMES	15
3. Estrategia de control	19
3.1. Teoría básica de Lyapunov	19
3.1.1. Formulación clásica del LMI	21
3.2. Seguimiento con acción integral	22

3.2.1. Comportamiento de la energía almacenada del SMES	23
4. Metodología propuesta y resultados	25
4.1. Aspectos considerados	25
4.2. Diseño del controlador	26
4.3. Aplicación y resultados	27
4.3.1. Consideraciones y sistemas de pruebas	27
4.4. Análisis de resultados	28
4.4.1. Alcance de la referencia	28
4.4.2. Alcance de la referencia con desbalance de tensión e inyección de armónicos	30
4.4.3. Alcance de la referencia considerando la integración de un generador eólico	33
5. Conclusiones	37
5.1. Futuros trabajos de investigación	38
Bibliografía	42

Índice de tablas

4.1. Parámetros de simulación	26
4.2. Valores de referencia para las potencias activa y reactiva	28
4.3. Parámetros generador de inducción eólico	34

Índice de figuras

2.1. Diagrama esquemático del sistema SMES (tomada de [1])	12
2.2. Conexiones típicas para el SMES, tomada de [2]: (a) Conexión usando convertidor de línea conmutada, (b) Conexión usando convertidor de fuente de voltaje y un convertidor dc/dc y, (c) Conexión usando convertidores de fuente de corriente	14
2.3. SMES integrado a la red con un PWM CSC, tomado de [2]	16
3.1. Descripción de un plano de fases para un punto de equilibrio estable e inestable: (a) Estable en el sentido de Lyapunov, (b) Asintóticamente estable y (c) Inestable (silla de montar).	20
4.1. Sistema de prueba	26
4.2. Índices de modulación m_d y m_q	29
4.3. Potencia en el lado ac P_{ac} y Q_{ac}	29
4.4. Corriente i_{dc}	29
4.5. Índices de modulación m_d y m_q	31
4.6. Potencia en el lado ac P_{ac} y Q_{ac}	31
4.7. Corriente i_{dc}	31
4.8. Índices de modulación m_d y m_q	32
4.9. Potencia en el lado ac P_{ac} y Q_{ac}	33
4.10. Corriente i_{dc}	33
4.11. Potencias activa y reactiva de la unidad SCIG	34
4.12. Índices de modulación m_d y m_q	34
4.13. Potencia en el lado ac P_{ac} y Q_{ac} entregada por la unidad SMES	35
4.14. Corriente i_{dc}	35
4.15. Suma de potencias en el lado ac P_{ac} y Q_{ac} al relizar la compensación por parte de la unidad SMES	36

Capítulo 1

Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia son parte fundamental del crecimiento económico y social de un país, ya que en gran medida los niveles de producción, el desarrollo agroindustrial y la calidad de vida de los ciudadanos son muy dependientes de estos [3, 4]. Aun así, gran parte de las fuentes de energía actuales son finitas y producen un gran impacto en el medio ambiente; el cual está produciendo cambios climáticos en el mundo. Además, con el crecimiento continuo del consumo energético a nivel mundial, la alta sensibilidad ante las variaciones de la demanda y sobre todo la necesidad de reducir las emisiones de CO_2 [5] se han generado intereses en incluir más la participación de las energías renovables. Debido a que estas se obtienen de forma natural, son prácticamente inagotables, bien sea por el volumen de la fuente o por su renovación mediante procesos naturales y finalmente porque son seguras y limpias [6].

El cambio de paradigma en el cual se está transformando la sociedad ha generado una evolución desde la red eléctrica convencional basada en tecnologías de generación clásicas que incluyen la generación hidráulica y térmica (carbón y gas natural, etc.) a sistemas con alta penetración de recursos energéticos distribuidos (*Distributed Energy Resources-DERs*), en los que destacan la generación eólica y solar fotovoltaica [3, 5, 7]. Sin embargo, estas fuentes de energías limpias tienen como desventaja la variabilidad de materia primaria (e.g. calor, viento, luz solar, etc.), la cual impiden una continua producción de energía eléctrica; para contrarrestar estas desventajas, existen múltiples dispositivos capaces de manejar y almacenar la energía producida por estas fuentes e.g. Baterías, unidades de almacenamiento de energía magnética por superconducción (*Superconducting Magnetic Energy Storage-SMES*), Flywheel, etc. Estos dispositivos almacenan energía cuando la demanda es inferior a la generación y la entregan cuan-

do la demanda es superior a la generación. Para realizar la inclusión de estas nuevas tecnologías a la red existente se hace uso de la electrónica de potencia a través de convertidores de potencia para poder inyectar la energía a la red [8].

La utilización de fuentes de energía renovable en sistemas de distribución aumenta los requerimientos de instrumentación, gestión y control, debido al grado de intermitencia y variabilidad de estas, por otro lado el uso de sistemas de almacenamiento de energía brindan la confiabilidad, disponibilidad y calidad del servicio que se requiere [9].

Por estos motivos, esta investigación busca diseñar un controlador que permita integrar una unidad de almacenamiento de energía, en este caso se decide utilizar una unidad SMES ya que esta ofrece ventajas únicas como el corto tiempo de respuesta, la baja cantidad de pérdidas, confiabilidad, estabilidad, la capacidad de soportar un gran número de ciclos de carga y descarga [9]. En la actualidad esta se aplica para entregar energía limpia en industrias que así lo requieran como las fábricas de microchips. Como implementación en la industria, los Flywheel, supercondensadores y SMES se adaptan mejor a las aplicaciones de corto plazo (elevada potencia y baja energía) mientras que almacenamientos de energía por aire comprimido y bombeo hidráulico son aplicaciones de elevada potencia [10, 11].

Los sistemas SMES almacenan energía eléctrica en forma de campo magnético creado por un flujo de corriente continua en una bobina superconductora; la cual es refrigerada criogénicamente a temperaturas inferiores a la temperatura crítica para no perder las propiedades de conducción. La energía almacenada puede ser devuelta a la red mediante la descarga de la bobina, para esto se utiliza un inversor bidireccional para integrar este sistema a la red. Las pérdidas del sistema de acondicionamiento de energía suelen estar en torno al 2-3 % en cada dirección por lo que teniendo en cuenta la carga y la descarga, la eficiencia total del sistema será mayor del 95 %; una de las ventajas de estos sistemas es que pueden ser descargados prácticamente por completo. Además, tiene una elevada velocidad de respuesta por debajo de los 100 ms, lo cual es adecuado para regular la estabilidad de una micro-red. Sin embargo, una desventaja es la refrigeración, ya que logra almacenar grandes cantidades de energía (5000 a 10000 MWh) mediante bobinas de gran tamaño [12].

En la actualidad se han realizados múltiples estudios para el control de potencia activa y reactiva desde un SMES, en los que se destacan controles convencionales como:

el tipo PI [13], [14], control por realimentación de variables de estado [15], [16], control predictivo [17], o lógica difusa [18]. Sin embargo, algunos de estos controles necesitan una sintonización, lo cual genera una etapa previa de acondicionamiento; sin embargo, algunos de estos controles no garantizan la estabilidad.

1.1. Planteamiento del problema

Hoy por hoy la humanidad se encuentra en una etapa de transición en la cual la inclusión de nuevas tecnologías amigables con el ambiente cada vez se vean incluidas en mayor medida gracias al acompañamiento constante y la fuerte inclusión de un pensamiento globalizado basado en la responsabilidad social y ambiental. Adicionalmente, el crecimiento demográfico y avance constante de la tecnología intrínsecamente está acompañado de un crecimiento exponencial de la demanda energética. Con el propósito de poder abastecer la curva de demanda energética que cambia minuto a minuto, los DER's y las unidades almacenamiento de energía entran a jugar un papel importante, ya que son el respaldo de la red para abastecer la energía que las grandes centrales no pueden producir en períodos de tiempo cortos cuando la demanda cambia de forma inesperada.

Los centros de control se encargan de mantener el funcionamiento dentro de los límites operativos aceptables del sistema eléctrico, monitoreando los niveles de tensión, frecuencia, producción de unidades generadoras y flujos de potencia por líneas de interconexión. Las variaciones en la potencia activa afectan principalmente a la frecuencia del sistema y las variaciones en la potencia reactiva son menos sensibles a cambios en la frecuencia y afecta localmente la magnitud de la tensión [?].

El uso de DER's son de gran importancia para reducir el impacto del cambio de la demanda, ya que son el respaldo para realizar un soporte de potencia en el sistema; para integrar estas tecnologías es necesario el uso de equipos almacenadores de energías como las unidades SMES, una alternativa adecuada con la capacidad de amortiguar las oscilaciones de potencia. Además, de una gran capacidad de almacenar grandes cantidades de energía, permitiendo así, el uso de los mismos con el propósito de respaldar en cortos instantes de tiempo el abastecimiento de la demanda en el sistema eléctrico colombiano [19].

De acuerdo a lo anterior, se presenta el reto de diseñar un controlador capaz de

incorpora unidades de almacenamiento a la red de distribución; en el presente trabajo se desea analizar el comportamiento de respuesta bajo cambios en la referencia de la potencia demandada de una red respaldada con una unidad SMES, esto gracias a la capacidad de entregar energía almacenada en cortos periodos de tiempo; con este fin se incorporará la unidad SMES mediante un sistema de control en lazo cerrado integrado a la red con un PWM-CSC (pulsewidth modulated current source converter). Diseñar un sistema de control es una tarea complicada, por ende se usará como herramienta la optimización matemática para lograr el objetivo.

La operación satisfactoria de un controlador en lazo cerrado, requiere de una adecuada sintonización del controlador, procedimiento para el cual es necesario determinar primeramente el tipo de controlador que se empleará, cual será el funcionamiento requerido del sistema y cual criterio se empleará para medir su desempeño, para esto se deben encontrar los valores de ganancia óptimos que puedan permitir el mejor desempeño posible del sistema.

1.2. Justificación

Debido a la necesidad de abastecer la curva de demanda energética que cambia minuto a minuto, es necesario tener fuentes de generación de energía eléctrica que sirvan como el respaldo de las centrales de generación principales y puedan inyectar la cantidad de potencia eléctrica faltante que no pueda ser producida por estas centrales en cortos lapsos de tiempo.

Hoy en día en el mundo la generación de energía eléctrica mediante recursos renovables está siendo ampliamente investigada debido a que se considera una forma limpia de generación. Sin embargo, su naturaleza variable, intermitente e impredecible ocasiona que no se garantice la producción constante de energía por lo cual se considera que no son despachables. Los sistemas de almacenamiento de energía se presentan como respuesta a las fluctuaciones de potencia. Su inclusión y selección se realiza teniendo en cuenta aspectos técnicos y económicos que pueden conservar la energía producida por estas fuentes e inyectarla al sistema por medio de convertidores *dc-ca* [20].

Esto implica implementar un sistema de control en la etapa del convertidor *dc-ca* que regula la cantidad de energía que se le suministra a la red de tal manera que permita la integración de sistemas de generación de energía alternativa a la red existente.

Esto es difícil debido a que el sistema de control debe tener la capacidad de suministrar la cantidad de potencia necesaria para realizar el respaldo de energía faltante a fin de lograr la satisfacción de la demanda en el menor tiempo posible sin alterar la confiabilidad del sistema eléctrico; el sistema de control debe tener la fiabilidad que garantice que la unidad SMES entregará la potencia almacenada cuando el sistema lo requiera y que la unidad de almacenamiento pueda ser cargada con éxito cuando el sistema eléctrico no requiera de soporte de energía adicional.

A través de cada uno de los estudios realizados, diversos métodos de control y tecnologías de almacenamiento de energía han sido propuestos con el propósito de dar la solución más apropiada, ingeniosa, rápida y económica a esta problemática; en este caso se opta por el uso de una unidad SMES que proporciona un tiempo de respuesta muy corto, tiene la capacidad de almacenar una cantidad alta de energía, puede ser utilizada en cualquier nivel de tensión (la ubicación topográfica no es un problema), no posee limitaciones ambientales, y lo más importante es que este sistema puede absorber o entregar potencia activa en cualquier instante en cuanto el sistema lo requiera.

Para el diseño del controlador, se elige utilizar un controlado PI; este es uno de los más utilizados en la industria, funciona de tal manera que la salida del controlador cambia en razón proporcional a la señal de error, el error es integrado lo cual tiene la función de promediarlo o sumarlo por un periodo determinado con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario.

Se elige usar también un método de optimización semidefinida (SDP) con el fin de encontrar los valores de ganancia adecuados y que permitan una modulación ideal para entregar energía a la red; la optimización semidefinida como herramienta de optimización es de gran utilidad ya que puede ser utilizada en varios contextos (sistemas de comunicación, sistemas de control, sistemas de potencia) y su velocidad de convergencia. En esencia, la SDP es una reformulación matemática para problemas no lineales con características similares a las de la programación lineal, finalmente, para problemas no lineales, la SDP presenta una formulación con mayor facilidad de implementación sin importar el número de variables asociadas al modelo.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Diseñar un sistema de control de potencia activa y reactiva de una unidad SMES para aplicaciones de soporte de potencia en un sistema de distribución.

1.3.2. Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica con el fin de comprender el tema a desarrollar.
- Estudiar el modelo dinámico de un SMES integrado con un PWM-CSC.
- Desarrollar una estrategia de control lineal para el control de potencia activa y reactiva del SMES por el método de *Lyapunov*.
- Validar la estrategia de control utilizada en un sistema de distribución considerando desbalance o inyección de armónicos.
- Aplicar la técnica de control para el soporte de potencia de un generador eólico.
- Realizar el análisis de los resultados obtenidos y redactar el documento final.

1.4. Estado del arte

El problema del control de potencia para el respaldo de potencia ha sido ampliamente analizado en la literatura internacional. En el 2009 Shiang-Shong Chen and Li Wang proponen un Nuevo esquema de generación eólica (WPGS) equipada con unidades SMES con el propósito de mejorar la estabilidad y mejorar la condiciones de operación sujeto a condiciones climáticas de viento variable, para esto la salida de las unidades SMES se controlan ajustando tanto el índice de modulación como el ángulo de fase de un convertidor bidireccional para realizar el control simultaneo de la potencia activa (P) y la potencia reactiva (Q) ; posteriormente en este trabajo se concluyó que la unidad SMES tiene la capacidad de controlar las condiciones de potencia deseadas y tiene características de amortiguación para mejorar la estabilidad [21].

Posteriormente Rintu Khanna, Member , Gurnam Singh y T.K.Nagsarkar, proponen en el 2014 el mejoramiento de la estabilidad transitoria en sistemas de potencia mediante un controlados de lógica difusa en una unidad SMES; en este estudio el controlador

se diseña para una maquina conectada a un barraje infinito Basado en los estudios de la estabilidad transitoria llevadas a cabo en una maquina conectada a un barraje bajo diferentes tiempos críticos de clarificación de fallas. Los resultados establecieron una efectividad superior en la mitigación de oscilaciones [18].

En este mismo año, los ingenieros G Pardhasaradhi, P.S.Raju, C T Chidambaram y K S Karthikeyan analizan el control de P y Q de una red de distribución considerando el efecto de una unidad SMES; esta tecnología responde rápidamente a los requerimientos de la red en comparación con otras tecnologías como el condensador, fly wheel, pumped storage etc. Aquí se estudio la comparación del desempeño del la unidad SMES y un capacitor como unidades de compensación demostrando que la unidad SMES tiene la capacidad de entregar energía P y Q y el capacitor solo energía Q; en este estudio se realizaron varias simulaciones en las que se pudo evidenciar que las unidades SMES pueden proveer el suficiente amortiguamiento en el periodo transitorio siguiente a una perturbación del sistema [22].

Posteriormente en el 2016 Abhijith Pappachen y A. Peer Fathima presentan la aplicación del controlador ANFIS (Sistema Neuro Fuzzy Adaptativo) para mitigar la variación del controlador de Frecuencia bajo Carga (LFC) en un sistema de energía hidrotérmica. Para mejorar el rendimiento LFC, la combinación SMES y los controladores de fase controlados por tiristores (TCPS) están incluidos en su área de control. La implementación de la combinación SMES-TCPS arresta la caída inicial de frecuencia, así como la línea de empalme y desviaciones de potencia después de una perturbación repentina de la carga. Para investigar la efectividad de la propuesta se analizo la dinámica del sistema con casos unilaterales, bilaterales y de violación de contratos para una pequeña perturbación de la carga. Los resultados simulados mostraron que el rendimiento del controlador ANFIS es mejor que el controlador PI convencional y el controlador de lógica difusa [23].

Singh, Verma, & Kumar (2016) encontraron que un convertidor de voltaje basado en HVDC provee una interconexión asíncrona entre dos sistemas AC, además el uso de VSC HVDC permite un control independiente de la potencia activa y reactiva al contrario de el HVDC convencional; por otro lado, el VSC HVDC no causa resonancia sub-sincrona (SSR) cuando está en los turbogeneradores. Debido a esto, analizaron la reducción de la SSR en el caso donde líneas HSC HVDC y series de compensación se originan en la misma subestación y se propuso un método de extracción de la com-

ponente subsíncrona de la corriente usando filtro; esto suprimió el flujo de corriente subsíncrona a través del generador e incrementó el damping del sistema a frecuencias críticas de torsión. Esta técnica que se denomina Inyección de Corriente SubSíncrona (SSCI) muestra la efectividad del inyector de corriente subsíncrona propuesto en el amortiguamiento de la SSR [24].

Un estudio en el reciente año por parte de Abdul Saleem Mir y Nilanjan Senroy plantean un esquema de control predictivo de modelo adaptativo de supervisión (AMPC), este se propone para un convertidor de fuente de voltaje basado en relativamente pequeño SMES para LFC aplicación. La referencia de potencia para las PYMES se deriva de los AMPC de tal manera que maneje eficazmente las restricciones de operación del sistema SMES. Un representativo sistema de primer orden que emula la dinámica de la retroalimentación del sistema del interruptor del SMES, se utiliza un algoritmo genético (GA) y se utiliza para derivar restricciones dinámicas para el costo Función en AMPC. La eficacia del régimen es demostrado a través de simulaciones [25].

1.5. Alcance

Este trabajo presenta un sistema de control de área amplia usando optimización semidefinida sobre una unidad SMES para el respaldo de potencia en una red de distribución. se busca reducir el tiempo de respuesta y las oscilaciones de potencia al abastecer la curva de demanda.

1.6. Principales resultados

Existen una amplios estudios sobre el uso de técnicas de optimización semidefinida aplicada al problema de diseño de controladores de potencia activas y reactiva en sistemas lineales, estas técnicas se les denomina usualmente como LMI; sin embargo, gran parte de la base matemática se suele tratar como una caja negra; Este trabajo presenta un estudio sobre la implementación de un sistema de control mediante el uso del modelo promediado de un convertidor PWM-CSC en una unidad SMES para el control de potencia activa y reactiva y servir de soporte para el abastecimiento de la demanda en una red de distribución integrando un generador eólico mediante simulaciones en

MATLAB y considerando restricciones de tipo LMI, para distintos casos de prueba en donde se comprueba la efectividad del control de área amplia.

1.7. Estructura del trabajo de grado

El trabajo de grado esta organizado de la siguiente forma. En el capítulo 1 se presenta la necesidad de implementar sistemas de control de potencia que permitan añadir fuentes de generación de energía limpia que contribuyan a el soporte de potencia en sistemas de distribución. El capítulo 2 presenta el modelo dinámico de la unidad SMES, posteriormente en el capítulo 3 se describira el funcionamiento y la estrategia de control propuesta los conceptos de optimización semidefinida y del análisis de estabilidad, direccionados hacia el control PWM usando restricciones LMI, en capítulo 4 se describen la metodología y los aspectos considerados para analizar el sistema, además se evidencian los resultados obtenidos sobre los sistemas de prueba considerando ciertos escenarios y finalmente, se presentan las conclusiones en el capítulo 5.

Capítulo 2

Sistema de almacenamiento de energía

En la primera sección se introduce el concepto de sistemas de generación distribuida y unidad de almacenamiento. Posteriormente se muestran los sistemas de acondicionamiento para la integración de estas tecnologías. Finalmente, se presenta el modelo dinámico de la unidad de almacenamiento que se usará en el desarrollo de este trabajo.

En el contexto de los sistemas de generación distribuida, las nuevas fuentes de energía se basan en aprovechar directamente los recursos de la naturaleza, no obstante los picos de producción energética no se ajustan a la demanda de energía; estas pueden presentar grandes fluctuaciones en sus ciclos diarios, estacionales, anuales de producción de energía. La curva de demanda, por su parte, puede variar a lo largo del día, de la semana o del año. En consecuencia, se requiere una reserva de energía, es decir, almacenar energía cuando hay excedentes y liberarla cuando la producción de energía no alcanza a cubrir las necesidades de la curva de demanda [26]. Esto no solo facilita la integración de renovables con la red eléctrica sino que también facilita su participación en los mercados eléctricos.

El estudio de superconductores datan que en 1911 cuando fueron descubiertos estos materiales en donde sus propiedades físicas (conductividad, resistencia nula, levitación estable de un material superconductor sobre un imán) parecían contradecir los principios básicos de la física [27]; no obstante fue hasta la década de los 70's que se propuso las unidades SMES como elemento almacenador de energía [28].

En la actualidad las unidades SMES han sido de especial estudio y aplicación debido a su alta capacidad de respuesta y a su alta eficiencia, por encima del 95 % durante la carga y descarga. Por ahora las aplicaciones de las unidades SMES se concentran principalmente en aplanar la curva de demanda, mejorar la estabilidad transitoria, mejorar la estabilidad de voltaje y aportar al mejoramiento de la calidad de la energía. Aunque las unidades SMES continúan siendo una tecnología muy costosa para ser aplicada en sistemas eléctricos dada la necesidad de materiales especiales para el núcleo de la bobina, el desarrollo de nuevos superconductores que soportan altas temperaturas ha hecho posible la reducción en tamaño de los SMES dado que se requiere menos elementos de refrigeración incrementa la eficiencia. Una de las falencias de estas unidades de almacenamiento es que requiere de una instalación especial que permita mantener las condiciones adecuadas que facilite el correcto funcionamiento de la bobina superconductora.

Es de gran importancia resaltar los diferentes Sistemas de Almacenamiento de Energía (ESS-Energy Storage Systems), ya que gracias a los avances de la electrónica de potencia y reducción en el costo de los materiales de construcción, se ha incrementado la implementación de estas a las redes eléctricas de distribución. Algunas de estas tecnologías son las baterías, los supercondensadores, flywheel systems, entre otras tecnologías y que en la actualidad están siendo implementados para mejorar la confiabilidad de la red eléctrica. A la hora de elegir ESS, existen dos factores importantes a considerar, uno es la cantidad de energía que requiere ser almacenada y el otro es la tasa a la cual dicha energía puede ser almacenada y entregada por la unidad requerida naturalmente; por otro lado, existen otros factores como el precio, temperatura de la unidad, vida útil, etc. La figura 2.1 ilustra en contraste de diferentes ESS aquí se muestra el rango de aplicación de diferentes sistemas de almacenamiento de energía esto es en función de su potencia nominal y de su tiempo de descarga a potencia nominal; como se puede observar, los sistemas SMES permiten almacenar grandes cantidades de energía por lo cual pueden ser utilizadas tanto a nivel de potencia como a nivel de distribución. Adicionalmente, el tiempo en que entrega la energía es del orden de segundos lo cual es de gran ventaja para contribuir a la mitigación de los cambios en la curva de demanda que cambia minuto a minuto. Estas dos características hacen que las unidades SMES sean potencialmente útiles en las aplicaciones que se estudiarán en este proyecto.

Los sistemas de almacenamiento de energía magnética por superconducción (SMES) almacenan energía de la misma forma que lo haría un inductor convencional. Para al-

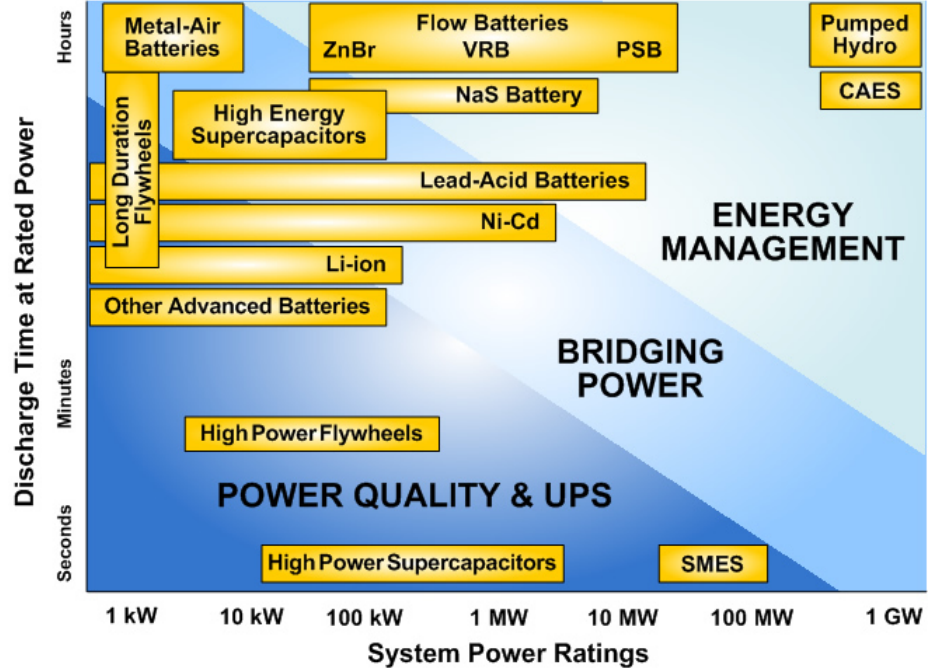


Figura 2.1: Diagrama esquemático del sistema SMES (tomada de [1])

macenar energía se genera un campo magnético gracias a las corrientes que fluyen a través de las espiras. La principal característica radica en que en el SMES, una corriente directa fluye a través de un alambre superconductor; adicionalmente el alambre se encuentra a temperaturas criogénicas gracias a la presencia de un refrigerante y reduce la resistencia óhmica al mínimo. La energía puede almacenarse en el SMES virtualmente por tiempo indefinido hasta que sea requerida. Dado que la energía es almacenada como corriente circulatoria puede conseguir tiempos de devolución de energía en un intervalo de minutos en incluso segundos, con picos de potencia elevados [19]. Este sistema de almacenamiento proporciona gran eficiencia, ya que la bobina superconductora prácticamente no tiene pérdidas por efecto Joule, y solo se consideran las pérdidas del convertidor electrónico (PWM-CSC), presentando pocas conversiones energéticas intermedias, por ello su capacidad de reacción a problemas de perturbaciones en la red en cortos periodos de tiempo.

Las unidades SMES están diseñadas para almacenar energía en su campo magnético gracias al flujo de una corriente dc en el bobinado; esta energía es cuantificada gracias

a la ecuación (2.1), a su vez la potencia se calcula gracias a la derivada de la energía como se denota en la ecuación (2.2).

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_{dc}^2 \quad (2.1)$$

La potencia dc almacenada en la bobina es

$$P_{dc} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{d(I_{dc}^2)}{dt} \quad (2.2)$$

Para conservar la temperatura a niveles criogénicos, se utiliza un criostato, que contiene helio o nitrógeno líquido. Existen dos tipos de materiales superconductores: los de baja temperatura o LTS (low temperature superconductors), que tienen una temperatura crítica del orden de los 5K (268.15 °C), mientras que los conductores de alta temperatura HTS (high temperature superconductors), tienen una temperatura crítica de los 70K (-203.15°C) [29, 30].

2.1. Sistemas de Acondicionamiento de Potencia para la integración del sistema SMES

Una unidad SMES utiliza la corriente DC para almacenar energía en su campo magnético, la corriente dc que fluye a través del cable superconductor de la bobina crea el campo magnético; dado que la energía es almacenada como una corriente que fluye, la energía puede ser entregada o almacenada por la unidad SMES mediante una respuesta casi instantáneamente en periodos de fracción de segundo o varias horas.

En una unidad SMES, es el sistema de acondicionamiento de potencia (PCS-Power Conditioning System) quien maneja la transferencia de potencia entre la bobina superconductora y el sistema ac ; esto permite controlar la potencia para que sea entregada a la red ac , haciendo control de la corriente dc y regulando la energía almacenada; un convertidor se clasifica según la tecnología y configuración topológica, los dos más utilizados para estas aplicaciones corresponden a: los LCC (line commutated converter) y los VSC (voltage source converter). Una tercera alternativa un poco menos estudiada es el PWM-CSC (pulse width modulated current source converters) que utiliza conmutación forzada tal como el VSC pero controla corriente en vez de tensión [2, 30–32]; en

la figura 2.2 se puede ver los tipos de convertidores integrados a la red.

La tecnología de conmutación basada en tiristores, fue una de las primeras en ser utilizadas en los sistemas SMES; sin embargo la desventaja de este tipo de convertidor es que inyecta armónicos a la red lo cual repercute en un desmejoramiento de la calidad de la forma de onda en el sistema *ac*. Así mismo, este tipo de convertidor tienen una controlabilidad limitada además de requerir un suministro constante de reactivos; en la figura 2.2 (a) se ilustra esta configuración.

Por otro lado, la tecnología de conmutación forzada mejora en gran medida la calidad de la forma de onda y permite realizar más acciones de control sobre el sistema *ac*, tales como controlar la potencia activa y reactiva de manera independiente y filtrado de corrientes por armónicos entre otras.

Los convertidores VSC son la más usados en aplicaciones industriales tales como transmisión HVDC, variadores de velocidad, integración de energías renovables entre otras; sin embargo, los VSC necesitan de una etapa adicional de conversión *dc/dc* ya que la bobina superconductora requiere una corriente constante y capacidad de varia-

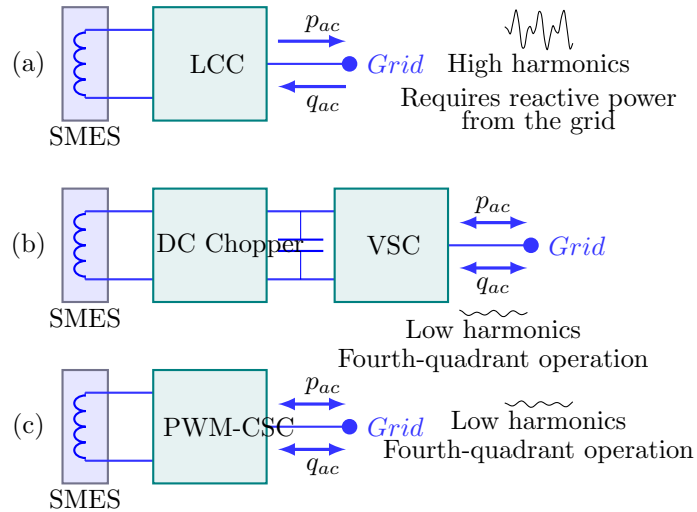


Figura 2.2: Conexiones típicas para el SMES, tomada de [2]: (a) Conexión usando convertidor de línea conmutada, (b) Conexión usando convertidor de fuente de voltaje y un convertidor *dc/dc* y, (c) Conexión usando convertidores de fuente de corriente

ción de la tensión (Ver figura 2.2(b)).

Finalmente un convertidor tipo CSC permite integrar directamente la bobina superconductora sin necesidad de etapas de conversión adicional. El lado de dc del CSC está conectado directamente con el superconductor de la bobina, y su lado de ac está conectado a la línea de alimentación a la red de distribución. Un banco de condensadores conectados a un terminal de entrada CSC se utiliza para amortiguar la energía almacenada en inductancias de línea en el proceso de conmutación de la corriente al lado de ac . Además, los condensadores pueden filtrar los armónicos de alto orden de la línea ac . A través de la regulación de las señales de activación de los dispositivos de conmutación de un CSC, la corriente en la bobina superconductora puede ser modulada para generar corriente mediante una señal PWM trifásica controlable hacia el lado ac ; y como el sistema SMES es inherentemente un sistema de corriente, la transferencia de potencias activas y reactivas entre el CSC y la red de distribución es muy rápida (Ver figura 2.2(c)).

2.2. Integración de una unidad SMES a la red de distribución

Como ya se ha indicado, son numerosas las ventajas del uso de una unidad de almacenamiento por superconducción con el propósito de compensar las variaciones que se reflejan en la curva de demanda. Pero en resumen, la unidad almacenadora sigue siendo una tecnología emergente; se debe considerar que debido a su construcción tienen un alto costo operativo, además su desempeño es mejor al proporcionar descargas intensas y constante actividad. El tiempo de respuesta de estas unidades es bastante rápido (menor a 100 ms); una característica que los hace ideales para regular la estabilidad de la red en un sistema de distribución y calidad de energía [33].

2.3. Modelo Dinámico del SMES

Para integrar la unidad SMES se requiere de los convertidores de potencia, los cuales regularan la energía inyectada a la red; dado que la unidad SMES utiliza el flujo de corriente i_{dc} para almacenar la energía, es más adecuado emplear un convertidor PWM-CSC, como el que se presenta en el figura 2.3. Para esto se analiza el modelo en

el marco de fases a, b, c y posteriormente se pasará a un marco de referencia invariante en tensión o, d, q por medio de la transformada de Park.

Al aplicar las leyes de Kirchhoff en el lado de ac , se obtiene:

$$\begin{aligned} C_k \cdot \frac{d}{dt} v_k &= -i_k + i_{sk}, \\ L_k \cdot \frac{d}{dt} i_k &= -e_k + v_k - R_k \cdot i_k, \\ \forall k \in (a, b, c), \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde, C_k representa el banco de capacitores, L_k y R_k representan el valor de la inductancia y resistencia del transformador trifásico respectivamente. i_k es la corriente del lado secundario del transformador, i_{sk} es la corriente de entrada del convertidor PWM-CSC, e_k es el voltaje equivalente de la red de distribución y v_k es la salida de voltaje del convertidor.

La corriente en el lado ac es el resultado del control por modulación sobre el convertidor, para esto se utiliza m_k , para denotar los índices de modulación directa y de cuadratura que corresponden a las señales de control, las cuales están limitadas entre -1 y 1, para evitar la sobre-modulación en el convertidor de la señal de modulación; estas corrientes pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$i_{sk} = m_k \cdot i_{dc} \quad \forall k \in (a, b, c) \quad (2.4)$$

Se utiliza la transformada de Park con el fin de transformar (2.3) y (2.4) al marco de referencia odq invariante en el régimen permanente [34]; se tiene entonces el sistema en el marco de referencia odq :

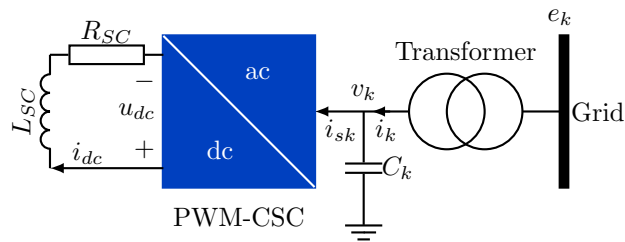


Figura 2.3: SMES integrado a la red con un PWM-CSC, tomado de [2]

$$\begin{aligned}
L_k \frac{di_d}{dt} &= -Rid - wLi_q + v_d - e_d, \\
L_k \frac{di_q}{dt} &= -Riq + wLi_d + v_q - e_q, \\
C_k \frac{dv_d}{dt} &= -id - wCv_q + m_d i_{dc}, \\
C_k \frac{dv_q}{dt} &= -iq + wCv_d + m_q i_{dc},
\end{aligned} \tag{2.5}$$

adicionalmente los índices de modulación de corriente en los ejes d y q pueden ser expresados como:

$$i_{sk} = m_k \cdot i_{dc} \quad \forall k \in (d, q), \tag{2.6}$$

donde, w corresponde a la frecuencia angular de la red de distribución; adicionalmente, se considera $R_k = R$, $L_k = L$ y $C_k = C$; después de analizar el modelo anterior, se concluye que la variable I_{dc} es la causa de la no linealidad, para esto se define un modelo lineal como se muestra en (2.7).

$$U_k = m_k \cdot i_{dc} \quad \forall k \in (d, q), \tag{2.7}$$

Sin embargo, este modelo solo corresponde al lado de ac , para integrar el lado dc se utiliza la ecuación de balance de potencia que relaciona la transferencia de potencia almacenada en la unidad SMES y que se inyecta a la red:

$$\begin{aligned}
P_{ac} &= -P_{dc} \\
P_{ac} &= \frac{3}{2}e_d i_d + \frac{3}{2}e_q i_q, \\
P_{dc} &= \frac{1}{2} \frac{d}{dt} I_{dc}^2, \\
\frac{d}{dt} I_{dc}^2 &= -2 \frac{R_{dc}}{L_{dc}} I_{dc}^2 + 3 \frac{e_d}{L_{dc}} i_d + 3 \frac{e_q}{L_{dc}} i_q,
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Organizando el modelo matricialmente,

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= Ax + Bu \\
y &= Cx
\end{aligned}$$

donde,

$$x = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -w & \frac{1}{L} & 0 \\ w & -\frac{R}{L} & 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 & 0 & -w \\ 0 & -\frac{1}{C} & w & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

Capítulo 3

Estrategia de control

En la primera seccion se explica la teoría de Lyapunov para sistemas lineales. Después de se muestra la formulación clásica de desigualdades lineales matriciales (*Linear Matrix Inequalities-LMI*). Después, se explica el seguimiento de acción integral para eliminar el error de estado estacionario. Finalmente, se presenta la aplicación del control al SMES.

3.1. Teoría básica de Lyapunov

La teoría de estabilidad de Lyapunov es una herramienta estándar y una de las más importantes en el análisis de sistemas no lineales [35]; Consideremos el siguiente sistema autónomo no lineal:

$$\dot{x} = f(x), \quad (3.1)$$

donde, $f : \mathcal{O} \longrightarrow \mathcal{R}^n$ es un mapa local de Lipschitz del dominio $\mathcal{O} \subseteq \mathcal{R}^n$ al \mathcal{R}^n . Supongamos que el sistema que se muestra en (3.1) tiene un punto de equilibrio en $\bar{x} \in \mathcal{O}$ (i.e., $f(\bar{x}) = 0$). Ahora, para determinar si el punto de equilibrio overline{x} es estable. Primero, asume que \bar{x} es el origen del espacio de estado. Esto no afecta la generalidad, ya que siempre podemos aplicar un cambio de variables $\xi = x - \bar{x}$ para obtener [35, 36]:

$$\dot{\xi} = f(\xi + \bar{x}) \equiv g(\xi). \quad (3.2)$$

El estudio de estabilidad ahora se hace para un nuevo sistema con respecto a $\xi = 0$. Tiene dos tipos de estabilidad [35].

Definición El punto de equilibrio $x = 0$ de (3.1) es

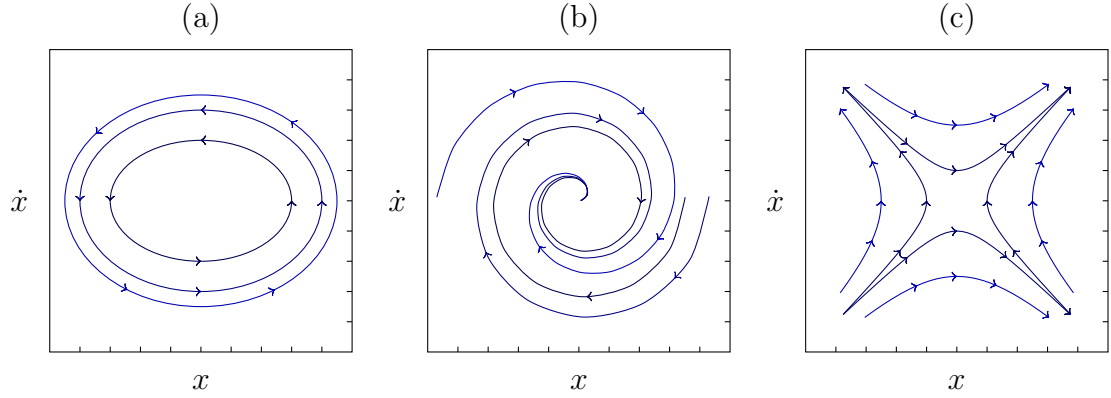


Figura 3.1: Descripción de un plano de fases para un punto de equilibrio estable e inestable: (a) Estable en el sentido de Lyapunov, (b) Asintóticamente estable y (c) Inestable (silla de montar).

1. **Estable** sí, para cada $\epsilon > 0$, existe un $\alpha = \alpha(\epsilon) > 0$ tal que

$$\|x(t_0)\| < \alpha \Rightarrow \|x(t)\| < \epsilon, \quad \forall t > t_0. \quad (3.3)$$

2. **Asintóticamente estable** sí, es estable y α se puede elegir de manera que

$$\|x(t_0)\| < \alpha \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x = 0. \quad (3.4)$$

También definimos inestable si, no es estable. In la Figura 3.1 se ilustran las diferencias entre estabilidad en el sentido de Lyapunov, estabilidad asintótica e inestabilidad.

Método directo de Lyapunov

Este método demuestra la estabilidad directamente por medio de funciones que se definen en el espacio de estado [35].

Theorem 3.1.1 (Teorema de Lyapunov) *Consideramos el sistema (3.1) y suponemos que existe a una función $V : \mathcal{O} \rightarrow \mathcal{R}$ continuamente diferenciable, tal que*

$$\begin{aligned} V(0) &= 0, \\ V(x) &> 0, & x \in \mathcal{O} \quad \forall x \neq 0 \\ \dot{V}(x) &= \frac{\partial V}{\partial x} f(x) \leq 0, & x \in \mathcal{O}. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Entonces, el punto de equilibrio es estable en el sentido de Lyapunov.

3.1.1. Formulación clásica del LMI

Un análisis de estabilidad basado en Lyapunov del sistema lineal (3.6) es fundamental para evaluar la estabilidad de los sistemas.

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_w w, \quad (3.6)$$

$$\dot{y} = Cx, \quad (3.7)$$

donde, $x \in R^n$ es el vector de estado del sistema, $y \in R^m$ es el vector de salida, $u \in R^r$ es el vector de entrada y $w \in R^s$ es el vector de entrada externa. $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times r}$, $B_w \in R^{n \times s}$ y $C \in R^{m \times n}$ son matrices de coeficientes constantes.

Este tipo de sistema (ver (3.6)) puede ser controlado usando una ganancia de realimentación de la siguiente forma

$$u = kx, \quad (3.8)$$

donde, $k \in R^{r \times n}$ es denominada la ganancia de realimentación. El sistema presentado en (3.6) son cuadráticamente estables con unidades de energía entradas si y solo si existe una función $V(x) : R^n \rightarrow R$ y una matriz $P \in R^{n \times n}$ que satisfacen (3.9), la cual disminuye a lo largo de cada trayectoria distinta de cero del sistema lineal.

$$\begin{aligned} V(x) &= x^T P x \leq \int_0^t w^T w dt \leq 1, \\ P &= P^T \succeq 0, \end{aligned} \quad (3.9)$$

donde, \succeq significa semidefinida positiva.

Observe que $V(x)$ es nuestra función candidata de Lyapunov, la cual satisface las dos primeras condiciones mostradas en el Teorema 3.1.1. Ahora, tomando la derivada en el tiempo de $V(x)$, se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= x^T P \dot{x} + \dot{x}^T P x \leq w^T w \leq 0, \\ &= (Ax + Bu + B_w w)^T P x + x^T P (Ax + Bu + B_w w) - w^T w \leq 0, \\ &= x^T A^T P x + u^T B^T P x + w^T B_w^T P x + x^T P A x + x^T P B u + x^T P B_w w - w^T w \leq 0, \end{aligned} \quad (3.10)$$

ahora, reemplazando 3.8 y aplicándole el complemento de Schur se llega a

$$\dot{V}(x) = \begin{bmatrix} x & w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^T P + P A + B k P + P k^T B^T & P B_w \\ B_w^T P & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \leq 0. \quad (3.11)$$

Para satisfacer la tercera condición del Teorema 3.1.1, solo se debe cumplir que

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA + BkP + Pk^T B^T & PB_w \\ B_w^T P & -I \end{bmatrix} \leq 0. \quad (3.12)$$

La desigualdad matricial anterior es no lineal, para convertirla en desigualdades lineales matriciales definimos las dos siguientes matrices

$$\begin{aligned} Q &= P^{-1} \\ S &= kQ. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Note que si $P \succeq 0$, entonces $P^{-1} \succeq 0$. Reemplazando (3.13) en (3.12), se obtiene

$$QA^T + AQ + BS + S^T B^T B_w B_w^T \leq 0. \quad (3.14)$$

Por lo tanto, se logra un controlador de realimentación básico al resolver el problema de optimización convexa dado por:

$$\begin{aligned} &\text{minimizar } f(Q, S) \\ &\text{sujeto a} \\ &Q \succeq 0 \\ &QA^T + AQ + BS + S^T B^T B_w B_w^T \leq 0, \end{aligned} \quad (3.15)$$

la función objetivo f puede ser arbitraria (siempre que sea convexa), en este caso sólo nos interesan las restricciones pues son las que garantizan estabilidad.

3.2. Seguimiento con acción integral

Debido a que el modelo de la unidad de almacenamiento de energía tiene algunas perturbaciones, es necesario también implementar una acción integral con el fin de reducir a el error del estado estacionario a cero; principalmente se adicionara una etapa adicional al controlador que calcule el error en la señal y sera usada como un termino de realimentación; se define el error de seguimiento como (3.16)

$$e = \int (r - y)dt = \int (r - Cx)dt, \quad (3.16)$$

donde, e es el valor de error de la acción integral y será considerada un estado adicional, r es el valor deseado de referencia $r = [x_1^{ref} \ x_2^{ref}]$, al considerar e como un nuevo estado, se amplía el modelo de espacio de estados (3.6) y (3.7):

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}u + \hat{B}_r r, \quad (3.17)$$

donde,

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -\bar{C} & 0 \end{bmatrix} \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad \hat{B}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad \hat{x} = \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

consecuentemente la ganancia de estado estacionario se verá también modificada:

$$u = kx + k_i e = \hat{k}\hat{x}, \quad (3.19)$$

donde, k_i es la ganancia de acción integral y \hat{k} es la matriz aumentada en el modelo de espacio de estados.

3.2.1. Comportamiento de la energía almacenada del SMES

El intercambio de potencia entre el lado ac y el lado dc del convertidor de potencia se gestiona mediante el almacenamiento de energía total en el SMES como se define en (2.8). La solución a esta ecuación diferencial se muestra en (3.20), la cual representa el intercambio de energía entre el lado ac y el lado dc .

$$z = z_o - D \int_0^t \mathcal{P}(\tau) d\tau \quad (3.20)$$

$$\mathcal{P}(\tau) = w^T y(\tau) = E_d i_d(\tau) + E_q i_q(\tau)$$

donde, $z = i_{dc}^2$, z_0 es la condición inicial (energía almacenada) en el SMES y siempre es mayor o igual a cero. $\mathcal{P}(\tau)$ corresponde al intercambio de la potencia activa entre el SMES y la red ac (ver (2.8)). Observe que la energía almacenada puede ser controlada con $\mathcal{P}(\tau)$ y es posible definir tres condiciones operativas, como se muestra a continuación:

- Si $\mathcal{P}(\tau)$ es positiva, el SMES se cargará (i_{dc} se incrementa).
- Si $\mathcal{P}(\tau)$ es negativo, el SMES se descargará (i_{dc} decrece).

- Si $\mathcal{P}(\tau)$ es igual a cero, el SMES no realizará intercambio de energía entre el SMES y la red ac . Por esta razón i_{dc} será constante.

Por otro lado, la potencia activa y la reactiva de la red se calculan como se muestra en (3.21), usando la teoría de marco de referencia dq [11].

$$\begin{aligned} p_{ac} &= \frac{3}{2} (E_d i_d + E_q i_q) \\ q_{ac} &= \frac{3}{2} (E_q i_d - E_d i_q) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Despejando i_d y i_q , y considerando los valores de referencia para la potencia activa y reactiva es posible obtener:

$$\begin{aligned} i_d^{ref} &= \frac{2}{3} \left(\frac{1}{E_d^2 + E_q^2} \right) (E_d p_{ac}^{ref} + E_q q_{ac}^{ref}) \\ i_q^{ref} &= \frac{2}{3} \left(\frac{1}{E_d^2 + E_q^2} \right) (E_q p_{ac}^{ref} - E_d q_{ac}^{ref}) \end{aligned} \quad (3.22)$$

donde, p_{ac}^{ref} y q_{ac}^{ref} son las referencias para la potencia activa y reactiva, respectivamente. Es necesario tener en cuenta no exceder la que la potencia activa que el sistema está entregando. Por esta razón, p_{ac}^{ref} en (3.22) se redefine como:

$$\begin{aligned} i_d^{ref} &= \frac{2}{3} \left(\frac{1}{E_d^2 + E_q^2} \right) (E_d \alpha p_{ac}^{ref} + E_q q_{ac}^{ref}) \\ i_q^{ref} &= \frac{2}{3} \left(\frac{1}{E_d^2 + E_q^2} \right) (E_q \alpha p_{ac}^{ref} - E_d q_{ac}^{ref}) \end{aligned} \quad (3.23)$$

donde, α se calcula como:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{if } z^{min} < z < z^{max} \\ 0 & \text{if } \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.24)$$

Capítulo 4

Metodología propuesta y resultados

Este capítulo inicialmente presenta la metodología empleada para llevar a cabo la simulación del sistema de control, se considera a grandes rasgos diseñar un sistema de control que regula la potencia entregada a la red de distribución a partir de la energía almacenada en una unidad SMES generada por una fuente de energía eólica; posteriormente se implementa el diseño del controlador en Matlab; el cual permite evaluar el controlador ante diferentes situaciones.

4.1. Aspectos considerados

Posterior al desarrollo del sistema de control, se considera un sistema de generación eólico integrado a una red de distribución considerando valores de una línea utilizando un modelo tipo pi con valores de línea L_{12} y R_{12} y valores Shunt R_1, C_1 y R_2, C_2 , los valores de la red de distribución se denotan por L_{sis} y R_{sis} . El generador eólico se integra a la red mediante una unidad de almacenamiento SMES que se denota como una inductancia muy grande con impedancia cero L_{SC} y mediante convertidor PWM-CSC; este sistema se ilustra en la figura 4.1.

Los parámetros para el sistema se muestran en la tabla 4.1.

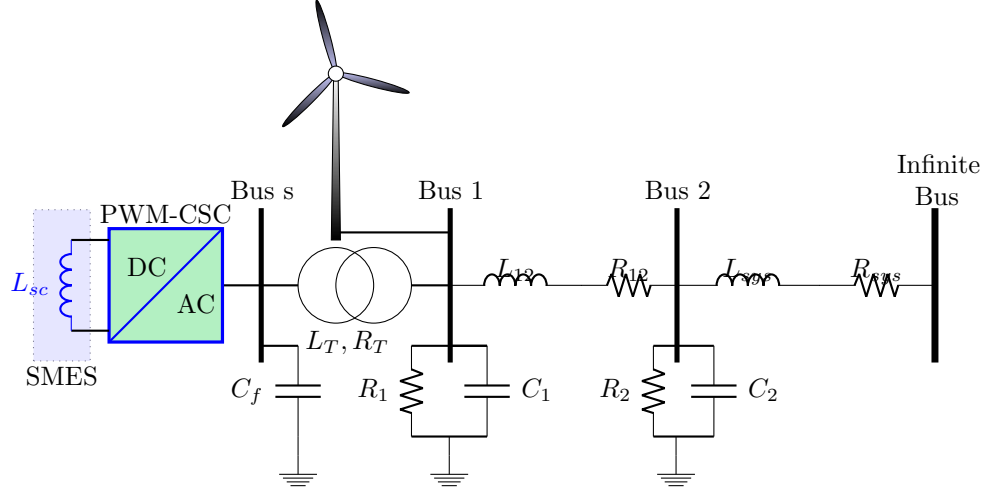


Figura 4.1: Sistema de prueba

Tabla 4.1: Parámetros de simulación

Parámetro	Valor	Unidad	Parámetro	Valor	Unidad
L_{sys}	2.5	mH	R_{sys}	5	$m\Omega$
L_{12}	1.5	mH	R_{12}	10	$m\Omega$
L_T	2.5	mH	R_T	1.25	$m\Omega$
L_{SC}	7.5	H	R_1	1	Ω
R_2	1	Ω	C_1	0.1	μF
C_2	0.1	μF	C_f	160	μF
i_{dc}^{min}	25	A	i_{dc}^{max}	100	A
v_{LL}^{rms}	440	V	-	-	-

4.2. Diseño del controlador

De acuerdo a la necesidad requerida, se diseña el controlador de forma que tenga la capacidad de absorber y entregar energía, esto con el propósito de proporcionar a la red de distribución la compensación de energía cuando así sea requerido de acuerdo a las variaciones en la curva de demanda y la capacidad de la red de abastecer esta demanda. El diseño de este sistema juega el rol de compensador de energía ante pequeñas variaciones en cortos periodos de tiempo contribuyendo a aplanar la curva de demanda.

Como estrategia de control se utiliza la herramienta de optimización *CVX* de Matlab para definir la matriz de ganancias de acuerdo a la función que se desea optimizar, implementado a un controlador LMI. El uso de la herramienta *CVX* se agrega como un anexo; con esta ganancias es posible realizar un control sobre la potencia i_{dc} que circula sobre la bobina de la unidad SMES.

4.3. Aplicación y resultados

Para realizar la evaluación del desempeño del sistema de control, se somete el sistema a tres casos diferentes para revisar la respuesta del sistema simulando posibles escenarios en los cuales puede estar sometida la unidad SMES; el sistema puesto a prueba se ilustra en la figura 4.1.

4.3.1. Consideraciones y sistemas de pruebas

Para poner a prueba el desempeño de la estrategia del sistema de control, se realizan simulaciones considerando los siguientes escenarios:

- En primer medida se realizan cambios en la referencia de potencia activa y reactiva del sistema en un periodo de tiempo 16 segundos con lo cual fue posible verificar la estabilidad del controlador y la capacidad del mismo al llevar la respuesta a la referencia y al desempeñarse de acuerdo a los parámetros deseados.
- Como segundo escenario se considera un cambio en la referencia de potencia activa y reactiva, adicionalmente, se le adiciona des-balance de tension en las fases del sistema; verificando que el controlador pueda soportar estos cambios y seguir la referencia. Posteriormente en este mismo escenario se considera la presencia de armónicos en la red.
- Finalmente como tercer escenario se implementa el modelo de un generador eólico al sistema, con el fin de evaluar la precisión del controlador.

Como consideración para estos escenarios, se asume que la unidad de almacenamiento SMES esta completamente cargada.

4.4. Análisis de resultados

Todos los escenarios propuestos, se simulan mediante el software Matlab, utilizando la herramienta Ordinary Differential Equation packages ODE23t para el planteamiento de cada uno de los datos y el cálculo de resultados.

4.4.1. Alcance de la referencia

Verificando la efectividad del controlador, se establece una potencia de referencia la cual debe ser seguida por el controlador; esto se realiza para mostrar que el controlador alcanza la referencia deseada. A continuación, en la tabla 4.2 muestra los valores de referencias deseados.

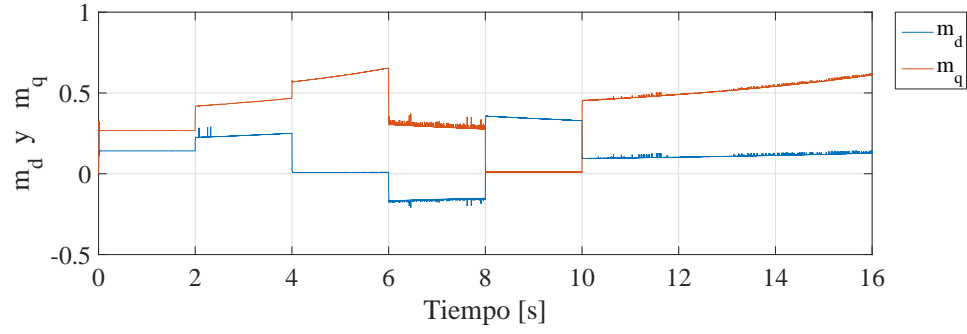
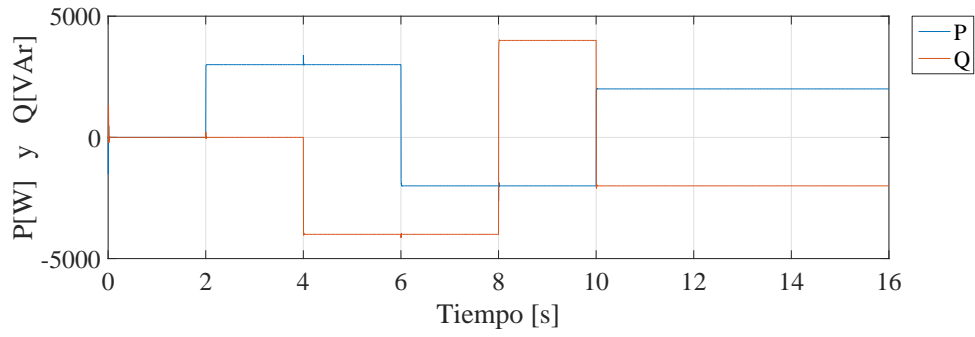
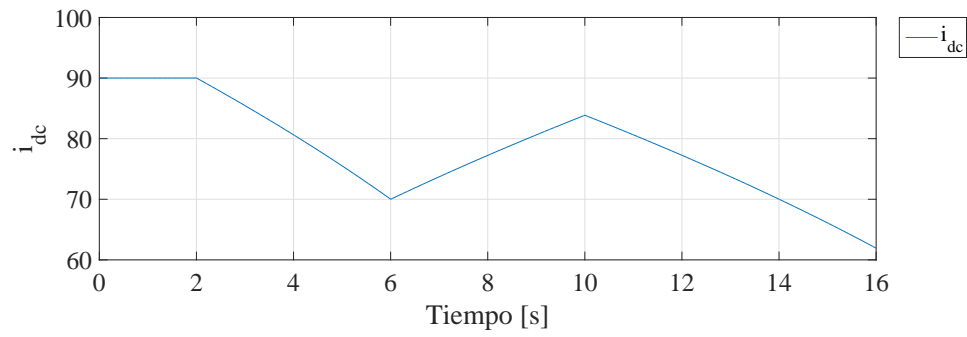
En las figuras 4.2-4.4 se ilustran las respuestas dinámicas de los índices de modulación, la potencia activa y reactiva, y la corriente i_{dc} del SMES.

De acuerdo al diseño el controlador cumple con el propósito, como se observa en la figura 4.2, los valores de modulación responden de forma apropiada a los cambios de potencia de la referencia, llevando el sistema al estado deseado.

Comparando la potencia activa de la figura 4.3 y la corriente dc del SMES de la figura 4.4 se puede notar que si la potencia toma valores positivos, la corriente del SMES comienza a decrecer; Esto significa que el SMES está entregando potencia activa a la red y caso contrario si la corriente dc crece. También, se puede notar que si la

Tabla 4.2: Valores de referencia para las potencias activa y reactiva

<i>Variable</i>	<i>Valor[kW]</i>	<i>t_i[s]</i>	<i>t_f[s]</i>
P_{ac}^{ref}	0	0	2
	3	2	6
	-2	6	10
	2	10	12
<i>Variable</i>	<i>Valor[kVAr]</i>	<i>t_i[s]</i>	<i>t_f[s]</i>
Q_{ac}^{ref}	0	0	2
	-4	4	8
	4	8	10
	-2	10	12

Figura 4.2: Índices de modulación m_d y m_q Figura 4.3: Potencia en el lado ac P_{ac} y Q_{ac} Figura 4.4: Corriente i_{dc}

potencia activa es cero, la corriente dc mantiene constante. Esto es debido que no hay transferencia de energía. De acuerdo a esto, la potencia reactiva no produce efectos

en el comportamiento de la corriente entregada por la unidad SMES; lo cual permite inferir que es posible transmitir potencia reactiva a la red por medio del convertidor sin la influencia de la unidad SMES.

De acuerdo a la acción de control, la potencia activa y reactiva siguen la referencia de acuerdo a lo estimado, los índices de modulación m_d y m_q ilustrados en la figura 4.2 actúan correctamente, ya que no alcanzan los valores de saturación.

4.4.2. Alcance de la referencia con desbalance de tensión e inyección de armónicos

Para continuar y evaluar la solidez del controlador, se utiliza la misma potencia de referencia indicada en la tabla 4.2 con lo cual se adicionan perturbaciones al sistema como sigue a continuación.

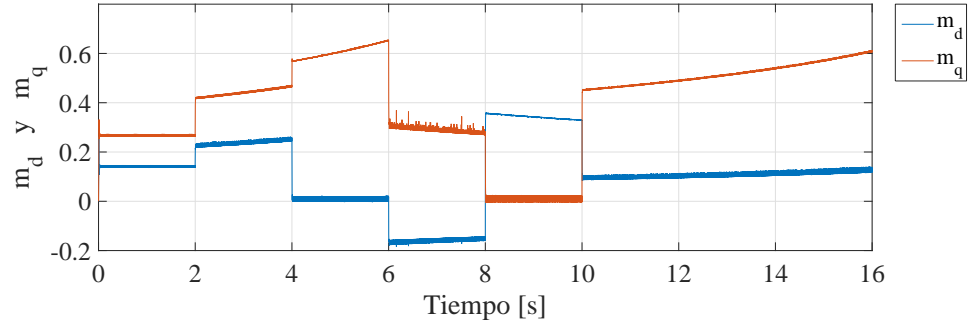
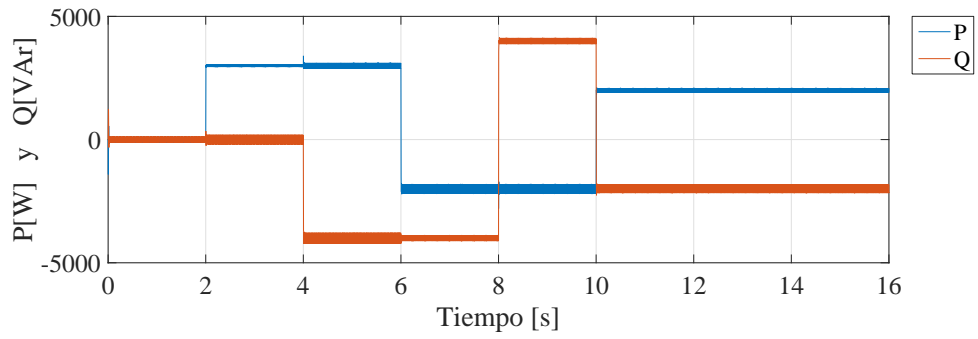
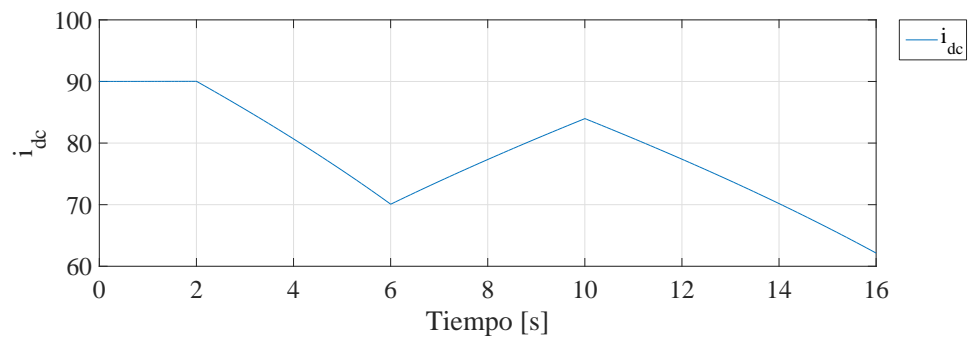
Desbalance de tensión

Se considera un desbalance de tensión en la red de distribución del $\pm 5\%$ en cada uno de las fases como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 400 \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ 1,05 \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ 0,95 \cdot \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} V \quad (4.1)$$

En las figuras 4.5 a 4.7 se ilustran las respuestas dinámicas de los índices de modulación, la potencia activa y reactiva, y la corriente i_{dc} del SMES cuando se considera desbalance de tensión en al red.

La figura 4.6 ilustra como el controlador aunque tiene oscilaciones sigue la referencia de potencia activa y reactiva indicada; esto debido a que la referencia esta cambiando y la acción integral no es capaz de alcanzar el valor de referencia, sin embargo, el controlador puede responder de forma adecuada bajo estas condiciones de operación; los índices de modulación tienen un comportamiento similar al caso anterior como se ilustra en la figura 4.5 la cual enseña la robustez del sistema.

Figura 4.5: Índices de modulación m_d y m_q Figura 4.6: Potencia en el lado ac P_{ac} y Q_{ac} Figura 4.7: Corriente i_{dc}

Es de resaltar que para este sistema los índices de modulación son cercanos a cero,

en este caso los índices no llegan al punto de saturación (± 1); además, se puede ver como el comportamiento de la corriente i_{dc} disminuye de acuerdo al valor de la potencia activa, esto se observa en la figura 4.7.

Introducción de armónicos

En este caso, se considera una inyección de armónicos en cada una de las fases de la red como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 400 \cdot \begin{bmatrix} \cos(\omega t) + \frac{1}{10}\cos(5\omega t - \frac{\pi}{6}) + \frac{1}{15}\cos(7\omega t - \frac{\pi}{3}) \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{10}\cos(5\omega t - \frac{5\pi}{6}) + \frac{1}{15}\cos(7\omega t - \pi) \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{10}\cos(5\omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{15}\cos(7\omega t + \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} V \quad (4.2)$$

En las figuras 4.8-4.10 se ilustran las respuestas dinámicas de los índices de modulación, la potencia activa y reactiva cuando se considera inyección de armónicos a la red.

Como se puede observar en la figuras 4.8-4.10, en este caso también se presentan oscilaciones y cambios de potencia, esto debido a los cambios en la referencia; Observe que el controlador es capaz de seguir la referencia, las figuras resultan ser similares al caso anterior, sin embargo, al analizar las figuras 4.8 y 4.9 los índices de modulación muestran adquirir valores con una oscilacion evidentemente superior al igual que potencia entregada a la red esto netamente debido a los armonicos con los que se asume este escenario; finalmente el comportamiento de la corriente i_{dc} es el esperado de acuerdo

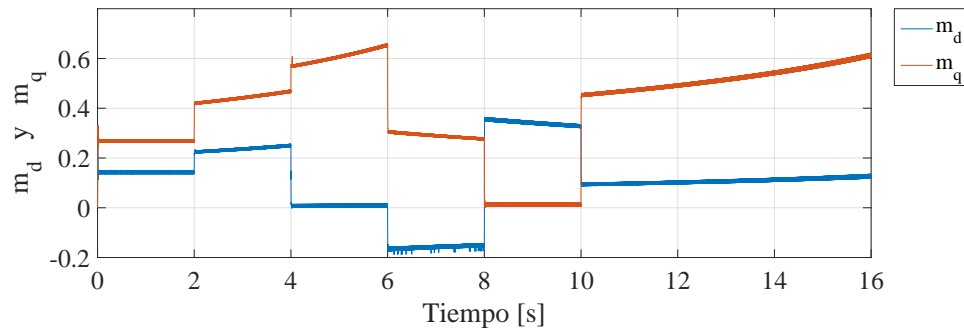
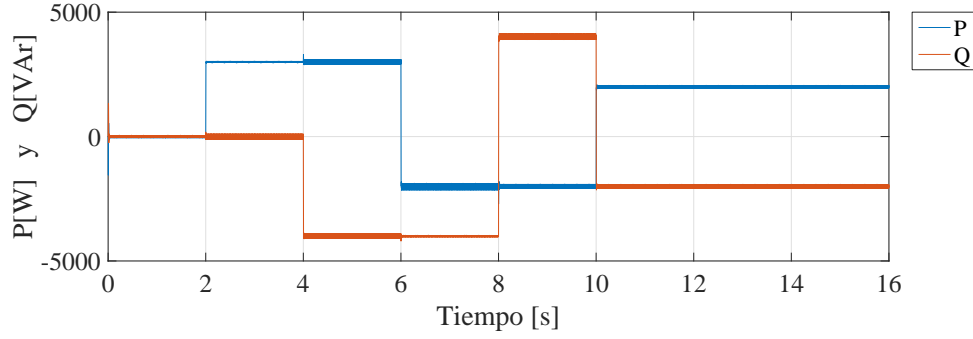
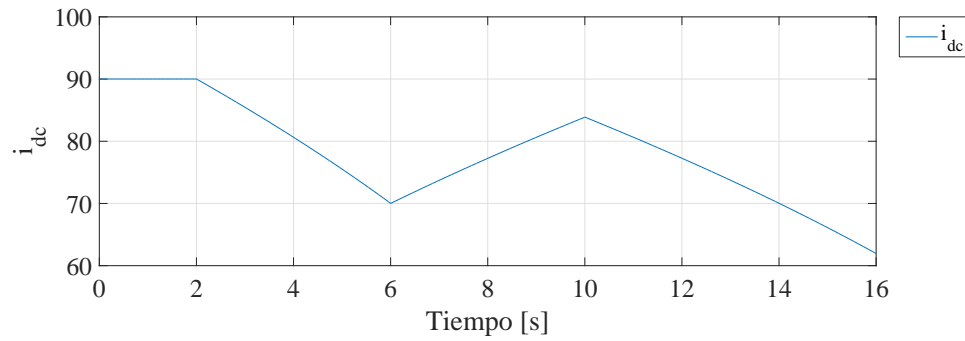


Figura 4.8: Índices de modulación m_d y m_q

Figura 4.9: Potencia en el lado ac P_{ac} y Q_{ac} Figura 4.10: Corriente i_{dc}

al comportamiento observado en los casos anteriores aumentando y disminuyendo de acuerdo a los valores de potencia activa.

4.4.3. Alcance de la referencia considerando la integración de un generador eólico

Para valorar la precisión del controlador, se implementa un generador eólico que puede inyectar potencia activa y reactiva a la red. Se considera entonces un generador eólico tipo 1 (*Squirrel-cage Induction Generator-SCIG*) conectado al bus-1, como se ilustra en la figura 4.1.

Por razones de simulación, se considera que el generador eólico es despachado con una potencia activa de $2500W$ y la potencia reactiva en $0VAr$. Sin embargo, la potencia

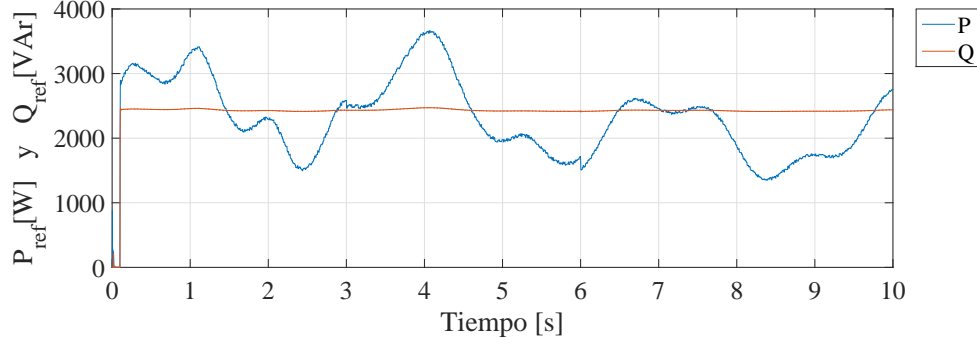
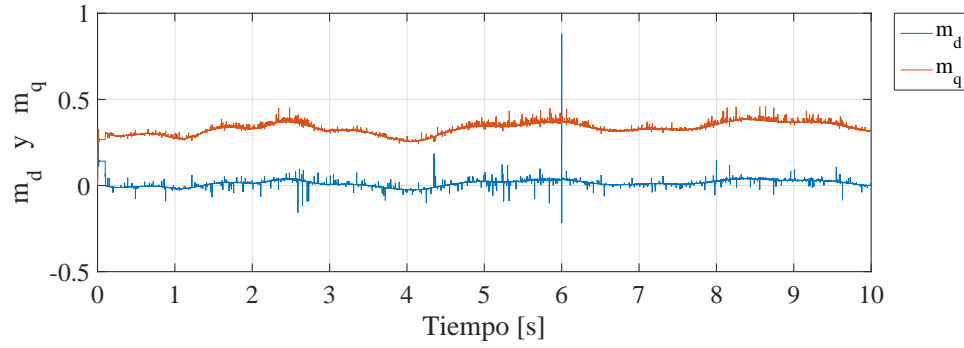


Figura 4.11: Potencias activa y reactiva de la unidad SCIG

Figura 4.12: Índices de modulación m_d y m_q

activa es variable a través del tiempo y debe ser compensada por la unidad de almacenamiento, como se puede observar en la figura 4.11. Los parámetros del generador se indican en la tabla 4.3, los cuales son tomados de [37].

La respuesta dinamica de la corriente i_{dc} fue la correcta e acuedo al estudio de los escenarios previos, de acuerdo a la variacion de la potencia de referencia ver figuras 4.14 y 4.11 en donde de acuerdo al aumento de potencia activa, i_{dc} disminuye, suponiendo

Tabla 4.3: Parámetros generador de inducción eólico

V_{nom}^{rms}	$r_1[\Omega]$	$r_2[\Omega]$	$X_1[\Omega]$	$X_2[\Omega]$	$X_m[\Omega]$
440	0.641	0.332	1.106	0.464	78.9

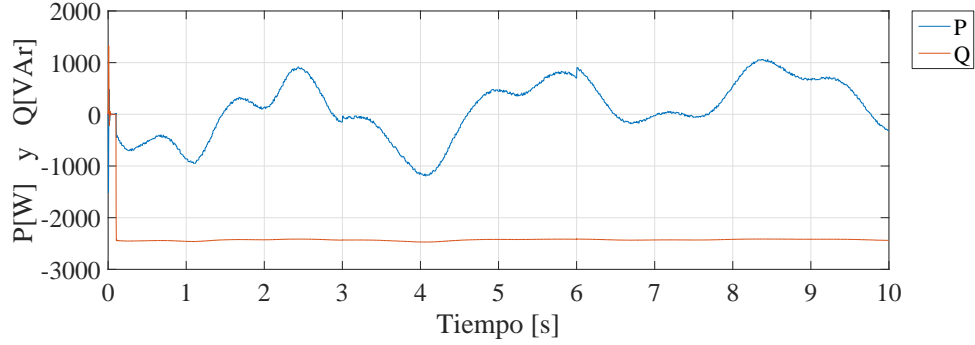


Figura 4.13: Potencia en el lado ac P_{ac} y Q_{ac} entregada por la unidad SMES

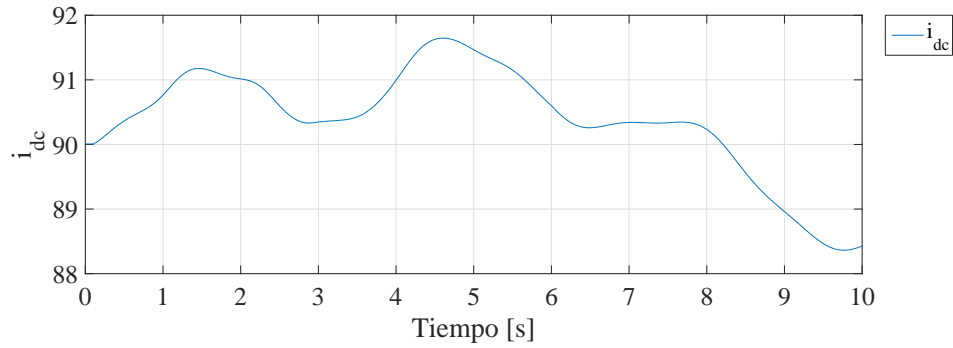


Figura 4.14: Corriente i_{dc}

un despacho de energía superior por lo cual sucede lo contrario al suponer un despacho de energía inferior.

De acuerdo a la figura 4.14 los índices de modulación se mantienen en un rango aceptable de acuerdo a lo esperado; en este escenario no se supera el punto de saturación.

Al analizar las figuras 4.11 y 4.12 se puede observar la precisión del controlador al mantener la potencia activa en la referencia deseada (2500W y 0Var) como se puede observar en la figura 4.15, en donde se pueden observar mínimas oscilaciones; al ser implementado uno de estos sistemas a la red incrementa la confiabilidad en el sistema ya que como sustenta en este trabajo es respaldar la red de distribución ante variaciones en cortos lapsos de tiempo.

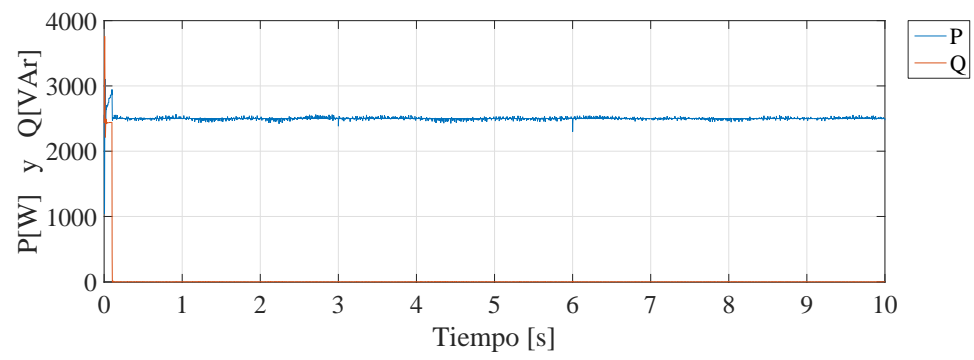


Figura 4.15: Suma de potencias en el lado ac P_{ac} y Q_{ac} al relizar la compensación por parte de la unidad SMES

Capítulo 5

Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo de una estrategia de control de sistema SMES integrado mediante PWM-CSC, con el fin de dar un respaldo inmediato, entregando energía almacenada a la red de distribución cuando esta así lo requiera y contribuir de esta manera al aplanamiento de la curva de demanda que puede cambiar a cada instante.

De acuerdo a lo estudiado en la unidad de almacenamiento utilizada en la este trabajo, es de gran importancia aondar n la investigacion e implementacion de nuevos diseos que permitan reduccion de costos de estas unidades con el fin de integrarlas mas facilmente a sistemas como el trabajado en este trabajo de grado.

El uso de un diseño de control con realimentación de estados utilizando la técnica de LMI (Linear Matricial Inequations) en problemas de diseño de controladores tiene como ventaja satisfacer condiciones mínimas de desempeño dinámico tales como la estabilidad, lo cual fue de gran utilidad en el desarrollo de este trabajo; adicionalmente el uso de esta técnica en conjunto con el modelamiento del sistema en espacio de estados y los criterios de estabilidad de Lyapunov presenta una alternativa para ser utilizada en sistemas no lineales como sería el comportamiento real de las unidades de generación de energia renovable

Ante cambios drásticos en forma de escalón y condiciones diferentes de cero, los índices de modulación de control respondieron de forma correcta arrojando las salidas correspondientes a las referencias dadas, con algunos pequeños transitorios.

Se evidenció que ante los cambios de potencia reactiva, la corriente almacenada i_{dc}

no presentó ningún cambio por lo cual sería posible implementar un controlador específicamente sobre la señal de potencia activa y controlar la corriente transferida a la red de distribución.

Los resultados obtenidos permitieron verificar el funcionamiento del control de bajo diferentes escenarios de prueba. Pues se encuentra una matriz de ganancias para los distintos casos, que hace posible el control y garantiza la efectividad del controlador sobre el sistema, fue muy importante el aporte realizado en el trabajo mediante la utilización de la optimización matemática con el fin de tener una mejor respuesta del controlador mediante los índices de modulación.

5.1. Futuros trabajos de investigación

Como trabajos futuros se propone experimentar otra técnica de control de optimización que cumpla de manera satisfactoria los objetivos de control y poder establecer un controlador más robusto para implementar en estos tipos de sistemas. También se podría incluir un modelo que represente otro tipo de sistemas de generación distribuida.

Bibliografía

- [1] J. San Martín, I. Zamora, J. S. M. V. Aperribay, and P. Eguía, “Energy storage technologies for electric applications.”
- [2] O. D. Montoya, W. Gil-González, A. Garcés, and G. Espinosa-Pérez, “Indirect ida-pbc for active and reactive power support in distribution networks using smes systems with pwm-csc,” *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 261–271, 2018.
- [3] J. A. Barbero, “La infraestructura en el desarrollo integral de américa latina.” *Francia*, vol. 167, no. 143, p. 23, 2013.
- [4] W. J. Gil-González, J. J. Mora-Flórez, and S. Pérez-Londoñ, “Análisis comparativo de metaheurísticas para calibración de localizadores de fallas en sistemas de distribución,” *Ingeniería y competitividad*, vol. 15, no. 1, pp. 103–115, 2013.
- [5] A. López Piñeiro, J. A. Somolinos Sánchez, and L. R. Núñez Rivas, “Modelado energético de convertidores primarios para el aprovechamiento de las energías renovables marinas= energetic modelling of primary converters for marine renewable energies,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 11, no. 2, pp. 224–235, 2014.
- [6] L. M. R. Fernández, V. P. G. Bote, and F. M. Anegón, “Análisis de la producción científica española en energías renovables, sostenibilidad y medio ambiente (scopus, 2003-2009) en el contexto mundial,” *Investigación Bibliotecológica: Archivonomía, Bibliotecología e Información*, vol. 27, no. 60, pp. 125–151, 2013.
- [7] O. D. M. Giraldo, W. J. G. González, A. G. Ruiz, A. E. Mejía, and L. F. G. Noreña, “Nonlinear control for battery energy storage systems in power grids,” in *2018 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, April 2018, pp. 65–70.

- [8] S. Alahakoon, “Significance of energy storages in future power networks,” *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 14–19, 2017.
- [9] O. D. Montoya, W. Gil-González, and F. M. Serra, “PBC Approach for SMES Devices in Electric Distribution Networks,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, pp. 1–1, 2018.
- [10] M. d. C. Clemente Jul, “Comparación de tecnologías de almacenamiento energético provenientes de energías renovables,” in *Anales de la Real Academia de Doctores de España*, vol. 16, no. 1. Real Academia de Doctores de España, 2012, pp. 29–49.
- [11] W. J. Gil-González, A. Garcés, and A. Escobar, “A generalized model and control for supermagnetic and supercapacitor energy storage,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 13, no. 26, pp. 147–171, 2017.
- [12] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. L. Trujillo, “Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes,” *Información tecnológica*, vol. 25, no. 2, pp. 175–188, 2014.
- [13] A. Ortega and F. Milano, “Comparison of different control strategies for energy storage devices,” in *Power Systems Computation Conference (PSCC), 2016*. IEEE, 2016, pp. 1–7.
- [14] A. Rahim, A. Mohammad, and M. Khan, “Control of subsynchronous resonant modes in a series compensated system through superconducting magnetic energy storage units,” *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 11, no. 1, pp. 175–180, 1996.
- [15] D. Giraldo and E. Giraldo, “Control por realimentación de variables de estado usando un observador adaptativo de estados,” *Scientia et technica*, vol. 1, no. 1, pp. 13–17, 2007.
- [16] C. A. Contreras Bernal, C. Orjuela, N. X. Lucia *et al.*, “Comparación de técnicas de control moderno (observadores de estado vs lqr) implementadas sobre un ar drone 2.0 parrot,” 2016.
- [17] C. Bordons Alba, “Control predictivo: metodología, tecnología y nuevas perspectivas,” *Aguadulce, Almería: Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática Universidad de Sevilla*, 2000.

- [18] R. Khanna, G. Singh, and T. Nagsarkar, "Power system transient stability improvement with fuzzy controlled smes," in *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), 2012 International Conference on.* IEEE, 2012, pp. 703–708.
- [19] G. González, "Almacenamiento de energía magnética por superconducción," *Prisma*, vol. 4, no. 1, pp. 29–32, 2016.
- [20] A. Escobar Mejía and M. Holguín Londoño, "Sistemas de almacenamiento de energía y su aplicación en energías renovables," *Scientia et technica*, vol. 17, no. 47, 2011.
- [21] M. Sheikh, S. Muyeen, R. Takahashi, and J. Tamura, "Smoothing control of wind generator output fluctuations by using superconducting magnetic energy storage unit," in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on.* IEEE, 2009, pp. 1–6.
- [22] G. Pardhasaradhi, C. Chidambaram, P. Raju, and K. Karthikeyan, "Real and reactive power control of electrical distribution network with smes and capacitor," in *Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2014 International Conference on.* IEEE, 2014, pp. 964–969.
- [23] A. Pappachen and A. P. Fathima, "Load frequency control in deregulated power system integrated with smes–tcps combination using anfis controller," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 82, pp. 519–534, 2016.
- [24] M. Janaki, N. Prabhu, R. Thirumalaivasan, and D. Kothari, "Mitigation of ssr by subsynchronous current injection with vsc hvdc," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 57, pp. 287–297, 2014.
- [25] A. S. Mir and N. Senroy, "Adaptive model predictive control scheme for application of smes for load frequency control," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017.
- [26] J. San Martín, I. Zamora, J. San Martín, V. Aperribay, and P. Eguia, "Energy storage technologies for electric applications."
- [27] G. A. Sahagún, S. C. Jiménez, J. F. Valdés, I. m. o. Preguntas, I. E. A. de los Griegos, V. L. g. s. de Maxwell, V. R. el atomismo, V. de los elementos, V. L. p. i. cuánticas, I. E. á. t. Estructura *et al.*, *Una ojeada a la materia.* Fondo de Cultura Económica, 2002.

- [28] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, “Energy storage systems for advanced power applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1744–1756, 2001.
- [29] A. G. Ruiz, *Sistemas de generacion de energia*. Universidad Tecnologica de Pereira, 2008.
- [30] W. Gil-González, O. D. Montoya, A. Garcés, and G. Espinosa-Pérez, “IDA-passivity-based control for superconducting magnetic energy storage with PWM-CSC,” in *2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, March 2017, pp. 89–95.
- [31] M. H. Ali, B. Wu, and R. A. Dougal, “An overview of smes applications in power and energy systems,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 38–47, 2010.
- [32] W. Gil-González, O. D. Montoya, A. Garcés, and A. Escobar-Mejía, “Supervisory LMI-based state-feedback control for current source power conditioning of SMES,” in *2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, March 2017, pp. 145–150.
- [33] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, and D. Morton, “Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid,” in *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*. IEEE, 2008, pp. 1627–1632.
- [34] S. S. Alepuz Menéndez, *Aportació al control del convertidor CC/CA de tres nivells*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.
- [35] H. Khalil, *Nonlinear Systems*, 3rd ed. Prentice-Hall, New Jersey, 2002.
- [36] M. Vidyasagar, *Nonlinear systems analysis*. SIAM, 2002.
- [37] S. Chapman, *Electric machinery fundamentals*. Tata McGraw-Hill Education, 2005.